

На правах рукописи

Мокшин Анатолий Васильевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОДИНАМИКИ
И ЭФФЕКТОВ ПАМЯТИ
В ПРОСТЫХ ЖИДКОСТЯХ**

01.04.02 – теоретическая физика

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Казань – 2004

Работа выполнена на кафедре теоретической физики Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования “Казанский государственный педагогический университет”.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Юльметьев Ренат Музипович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Царевский Сергей Леонидович

доктор физико-математических наук,
профессор Сабурова Регина Васильевна

Ведущая организация: Казанский физико-технический институт
им. Е.К. Завойского КазНЦ РАН

Защита состоится “_____” _____ 2004 года в 14³⁰ часов
на заседании диссертационного совета Д 212.081.070 при Казанском
государственном университете имени В.И. Ульянова-Ленина по адресу: 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 18.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке им.
Н.И. Лобачевского Казанского государственного университета.

Автореферат разослан “_____” _____ 2004 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физ.-мат. наук, профессор

М.В. Еремин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Исследование релаксационных процессов, протекающих на микроскопических пространственных масштабах в жидких средах, относится к одной из наиболее важных задач современной физики конденсированного состояния. С одной стороны, актуальность подобного рода теоретических исследований обусловлена наличием в настоящее время богатого экспериментального материала по неупругому рассеянию нейтронов и рентгеновских лучей, требующего соответствующей интерпретации. С другой стороны, различные характерные для жидкостей коллективные свойства, например, так называемые “звуковые волны”, наблюдаются также в фазах переохлажденной жидкости и стекловидного состояния. Соответствующее изучение этих явлений на уровне жидкого состояния вещества стимулирует развитие физики фазовых переходов и критических явлений.

К настоящему времени в релаксационных процессах установлено наличие эффектов памяти и пространственно-временной нелокальности, которые могут появляться, например, из-за неупорядоченной геометрической структуры с крупномасштабными корреляциями или наличия медленно спадающих временных корреляций в различных динамических переменных. С этой точки зрения разработка теоретического подхода в описании динамических свойств жидкостей, адекватно учитывающего эти эффекты, является актуальной и необходимой.

Цель настоящей работы состоит в исследовании микродинамики и эффектов статистической памяти в простых жидкостях: жидких щелочных металлах и Леннард-Джонсовских жидкостях.

Научная новизна работы заключается в следующем.

На основе принципов Боголюбова о сокращенном описании и об иерархии времен релаксации построена микроскопическая теория структурной релаксации, описывающая спектры динамического структурного фактора и хорошо согласующаяся как с экспериментом, так

и с ранее полученными теоретическими результатами.

Впервые выполнен детальный анализ эффектов памяти в структурной релаксации в жидкостях для широкого диапазона волновых чисел.

На основе новейших экспериментальных данных неупругого рассеяния рентгеновских лучей получено убедительное подтверждение гипотезы Балукани об универсальной природе динамических процессов в жидких щелочных металлах.

Впервые исследованы временные масштабы и выполнена численная оценка эффектов памяти в тепловом движении частиц в Леннард-Джонсовских жидкостях. На основе разработанного в работе подхода предложены новые выражения для коэффициента самодиффузии. Найдена взаимосвязь между параметром немарковости и коэффициентом самодиффузии, а также впервые получено соотношение, связывающее параметр немарковости и конфигурационную энтропию.

Выполнено исследование немарковских эффектов для модели Рабина: частица в гармонической решетке.

Научная ценность и практическая значимость. Предложенная микроскопическая теория структурной релаксации в жидкостях и полученное выражение для динамического структурного фактора могут быть использованы при интерпретации и анализе экспериментальных спектров в неупругом рассеянии нейтронов и рентгеновских лучей, а также могут послужить основой для развития теорий, описывающих динамику фазовых переходов и стекольного состояния вещества.

Полученное в работе подтверждение гипотезы об универсальности динамических процессов в жидких щелочных металлах позволяет избежать трудностей, связанных с разделением одночастичного и коллективного вкладов, а также удалением шумов при анализе экспериментальных данных по рассеянию медленных нейтронов.

Найденные в работе выражения для коэффициента самодиффу-

зии могут быть в дальнейшем обобщены к другим транспортным характеристикам (по аналогии с формулами Кубо-Грина).

Обнаруженная взаимосвязь между конфигурационной энтропией и параметром немарковости автокорреляционной функции скорости позволяет использовать этот параметр в качестве дополнительного критерия неупорядоченности системы.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Предложенная микроскопическая теория структурной релаксации в простых жидкостях адекватно описывает динамику флуктуаций локальной плотности в жидких щелочных металлах, а также качественно воспроизводит экспериментальные результаты неупругого нейтронного рассеяния и рассеяния рентгеновских лучей.

2. Гипотеза Балукани об универсальности динамических процессов в жидких щелочных металлах подтверждается анализом экспериментальных данных неупругого рассеяния рентгеновских лучей.

3. Флуктуации локальной плотности в жидких щелочных металлах в области промежуточных значений волнового числа характеризуются ярко выраженными статистическими эффектами памяти.

4. Немарковские эффекты в тепловом движении частиц в Леннард-Джонсовских жидкостях связаны с неупорядоченностью среды и усиливаются с уплотнением среды и понижением температуры. Выражение для коэффициента самодиффузии, полученное на основе идеи о сокращенном описании, хорошо согласуется с результатами компьютерного моделирования молекулярной динамики для Леннард-Джонсовских жидкостей на широком интервале температур и плотностей.

Апробация работы. Основные материалы диссертационной работы докладывались на I Международной конференций “Physics of Liquid Matter: Modern Problems” (Kiev, Ukraine, 2001), итоговой республиканской конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (Казань, 2002), IX Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным нау-

кам “Ломоносов-2002” (физический факультет, МГУ, Москва, 2002), V Международном конгрессе по математическому моделированию (ОИЯИ, Дубна, 2002), XXXIII Совещании по физике низких температур (Екатеринбург, 2003), научно-практической конференции студентов и аспирантов ВУЗов г. Казань (Казань, 2002-2003), XI Международной школе-конференции “Foundation and Advances in Nonlinear Science” (Belarusian State University, Minsk, Belarus, 2003), Всероссийском семинаре “Флуктуации и шумы в сложных системах” (Казань, 2004), VI Международной научно-технической конференции “Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии” (Владимир, 2004), III Междисциплинарной научной конференции “НБИТТ-21” (ПетрГУ, Петрозаводск, 2004), 17 Marian Smoluchowski Symposium on Statistical Physics (Zakopane, Poland, 2004) а также на научных семинарах кафедры теоретической физики КГПУ (2000-2004).

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 16 работ, из них 7 статей в центральной научной печати и 9 тезисов различных научных конференций.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографии. Работа изложена на 165 страницах, включая 28 рисунков, 4 таблицы и библиографию из 193 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность и новизна выбранной темы, обозначены цель, практическая значимость исследования, а также положения, выносимые на защиту, кратко изложены структура и содержание работы.

В первой главе приводится краткий обзор основных теоретических концепций, развиваемых для изучения динамических корреляций в конденсированных средах. Особое внимание уделяется формализму временных корреляционных функций (ВКФ). Рассматривается взаимосвязь ВКФ с экспериментально измеряемыми величинами,

динамическим структурным фактором $S(k, \omega)$ и функцией некогерентного рассеяния $S_s(k, \omega)$, которые могут быть найдены из опытов по рассеянию света, нейтронов и рентгеновских лучей, а также определены с помощью компьютерного моделирования молекулярной динамики. Здесь же обсуждаются основные свойства динамического структурного фактора как характеристики коллективных свойств системы, а также асимптотическое представление ВКФ.

Во второй главе рассматривается применение техники проекционных операторов Цванцига-Мори в исследовании динамических свойств простых жидкостей. На примере ВКФ флуктуаций локальной плотности показана схема построения цепочки зацепляющихся немарковских кинетических уравнений. Данная техника позволяет на основе некоторой начальной переменной получить целый набор ортогональных динамических переменных $\mathbf{A} = \{A_0, A_1, A_2, \dots, A_n, \dots\}$:

$$\langle A_l A_m \rangle = \begin{cases} 0, & l \neq m, \\ \langle |A_l|^2 \rangle, & l = m, \end{cases} \quad (1)$$

где $A_n = \mathcal{L}A_{n-1} - \Omega_{n-1}^2 A_{n-2}$, $n = 1, 2, \dots$, \mathcal{L} – оператор Лиувилля.

Здесь также представлен вывод рекуррентного соотношения для оператора временной эволюции. Далее показано определение динамических переменных, функций памяти и частотных релаксационных параметров через такие характеристики как потенциал межчастичного взаимодействия, двух-, трех-, четырех-частичные функции распределения и т.д.

Здесь же обсуждаются такие теоретические методы, использующие формализм функций памяти, как обобщенная гидродинамика, метод взаимодействующих мод, рассматривается асимптотическое поведение функций рассеяния в коротко-волновом пределе. Далее обсуждаются критерии, используемые в различных теоретических подходах для оценки эффектов памяти; показана взаимосвязь параметра немарковости с динамическим структурным фактором. Детально рассматривается проблема о замыкании бесконечной цепочки

ки и приводятся способы замыкания, получаемые на основе перехода к марковскому (немарковскому) пределу с быстро-затухающей (медленно-спадающей) памятью, рассматриваются трех-полюсное и гауссово приближения, приближение модельными функциями и метод, основанный на идеях Боголюбова. И, наконец, здесь обсуждается коротко-временная асимптотика временных корреляционных функций, получаемых из последнего метода, с точки зрения подхода рекуррентных соотношений М.Х. Ли (М.Н. Lee).

В третьей главе на основе идей о сокращенном описании и об иерархии времен релаксации, адаптированных к концепции временных корреляционных функций, выводится выражение для динамического структурного фактора и анализируется его низкочастотное поведение. Здесь важным является то, что конечное соотношение не содержит абстрактных параметров с неясным физическим смыслом, а выражается непосредственно через частотные релаксационные параметры $\Omega_1^2(k)$, $\Omega_2^2(k)$, $\Omega_3^2(k)$, $\Omega_4^2(k)$, которые связаны с потенциалом межчастичного взаимодействия $U(r)$ и функциями распределения частиц. Здесь же показана взаимосвязь с другими теоретическими результатами. Как оказалось, развиваемая в работе теоретическая модель хорошо согласуется с подходом обобщенных мод. Так, например, она позволяет получить ключевое в подходе обобщенных мод разложение для Лаплас-образа функции памяти второго порядка:

$$\widetilde{M}_2(k, s) = \sum_j \frac{A_j(k)}{s + \tau_j^{-1}(k)}, \quad j = 1, 2, 3, 5, \dots, \quad (2)$$

а известная вязкоупругая модель и двух-экспоненциальная вязкостная модель возникают здесь лишь как частные случаи.

Численные расчеты выполнены для жидких щелочных металлов (*Li*, *Na*, *Rb* и *Cs*) при температурах, близких к температурам плавления T_m , в области так называемых промежуточных и низких значений волнового числа k , где в спектрах динамического структурного фактора кроме центрального пика ($\omega = 0$) наблюдается также высокочастотный пик ($\omega \neq 0$). Теоретические результаты сравнивались

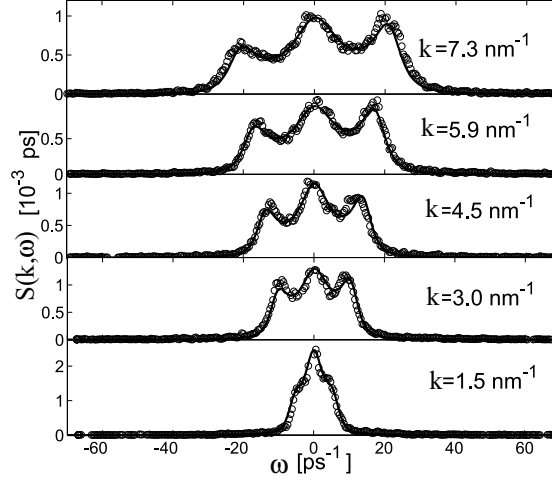


Рис. 1: Динамический структурный фактор жидкого Na при $T = 390K$: сплошная линия – теоретические результаты, (o) – экспериментальные значения.

с данными неупругого рассеяния нейтронов (Rb и Cs) и с новейшими данными по неупругому рассеянию рентгеновских лучей (Li и Na). Во всех случаях получено хорошее согласие теории с экспериментальными данными. Результаты численных расчетов $S(k, \omega)$ для случая жидкого натрия представлены на рис. 1.

Далее, на основе экспериментальных данных неупругого рассеяния рентгеновских лучей выполняется проверка гипотезы Балукани (U. Balucani, A. Torcini, R. Vallauri // Phys. Rev. B - 1993.-V.47.-P.3011-3020.) об универсальности динамических процессов в жидкостях, которая ранее подтверждалась результатами компьютерного моделирования молекулярной динамики. Проведенный анализ экспериментальных спектров $S(k, \omega)$ также подтвердил справедливость этой гипотезы.

Отдельным и важным этапом выполненного исследования являлась оценка эффектов статистической памяти во временных корреляциях.

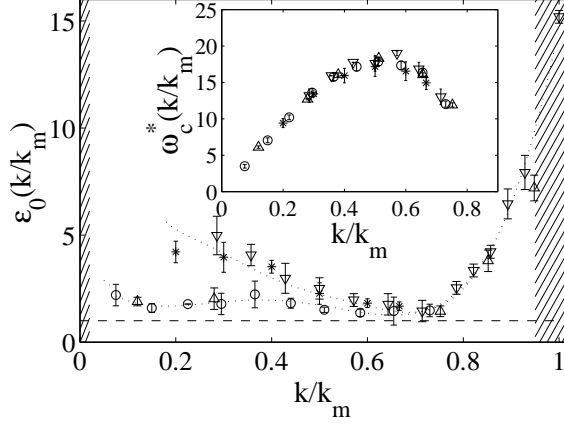


Рис. 2: Основной рисунок: k/k_m -зависимость параметра немарковости для различных жидких щелочных металлов: Li – (Δ), Na – (\circ), Rb – ($*$) и Cs – (∇). Рисунок-вставка: дисперсионная кривая бокового пика в $S(k, \omega)$.

реляциях локальной плотности, которая была осуществлена через вычисление пространственной дисперсии параметра немарковости $\varepsilon_0(k)$, а также статистического спектра частотно-зависящего обобщения параметра немарковости $\varepsilon_n(k, \omega)$, $n = 0, 1, 2, \dots$. На рис. 2 представлены результаты расчетов пространственной дисперсии параметра немарковости для флуктуаций локальной плотности в жидких щелочных металлах. Данная величина определяет отношение времени релаксации исходной ВКФ флуктуаций локальной плотности к времени релаксации ее функции памяти и может быть найдена непосредственно из экспериментальных данных:

$$\varepsilon_0(k) = \Omega_1^2(k) \left[\frac{\pi S(k, \omega = 0)}{S(k)} \right]^2, \quad (3)$$

где $S(k)$ – статический структурный фактор.

Из рисунка видно, что в области промежуточных значений волнового числа, заключенной между гидродинамической областью (ле-

вая заштрихованная область) и областью первого пика в статическом структурного факторе (правая заштрихованная область), в поведении параметра немарковости для жидких щелочных металлов наблюдается сильный “провал” (в гидродинамической области: $\varepsilon_0(k) \rightarrow \infty$). Таким образом, марковское поведение, характерное для гидродинамического предела, сменяется в этой области немарковским режимом. Немарковость начинает ослабевать лишь при исчезновении высокочастотной коллективной моды в спектрах динамического структурного фактора (см. вставку на рис. 2) и при прохождении значения $0.75k/k_m$, k_m соответствует главному максимуму в $S(k)$. В пространственных координатах это значение соответствует ~ 1.3 межчастичных расстояния. Область $k/k_m \approx 1$, известная так называемым де-женновским сужением спектров $S(k \approx k_m, \omega)$, как видно из рисунка, характеризуется слабыми эффектами памяти. Анализ частотно-зависящего обобщения параметра немарковости полностью подтвердил наличие сильных эффектов памяти в пространственно-частотных областях, соответствующих высокочастотным коллективным возбуждениям.

В четвертой главе рассматривается приложение идей, предложенных в главе II, к исследованию явлений переноса массы и непосредственному вычислению коэффициента самодиффузии в Леннард-Джонсовских жидкостях. В результате были получены выражения для коэффициента самодиффузии, численный расчет которых также был выполнен для широкого диапазона температур и плотностей Леннард-Джонсовских жидкостей. Сравнение теоретических результатов с данными моделирования молекулярной динамики (см. рис. 3) показывает, что наилучшее согласие между теорией и результатами моделирования дает следующее выражение для D :

$$D = \frac{k_B T}{m} \frac{1}{\omega^{(2)}} \left[\frac{\omega^{(4)}}{\omega^{(2)}} - \omega^{(2)} \right]^{1/2}, \quad (4)$$

где $\omega^{(2)}$ и $\omega^{(4)}$ – второй и четвертый частотные моменты автокоррелятора скорости частицы. На основе этого можно сделать вывод

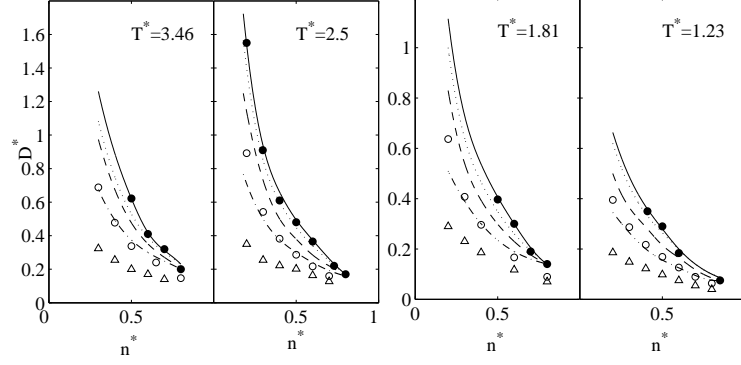


Рис. 3: Зависимость $D^* = D(m/\epsilon\sigma^2)^{1/2}$ от приведенной плотности $n^* = n\sigma^3$ при значениях температуры $T^* = k_B T/\epsilon = 3.46, 2.5, 1.81$ и 1.23 (ϵ, σ – потенциальные параметры). (Δ) – результаты для самодиффузии при $\tau_1 = \tau_0$, (сплошная линия) – результаты уравнения (4), (\circ) – результаты для самодиффузии при $\tau_3 = \tau_2$, (\cdots) – результаты модели Танкешвара (К. Tankeshwar): приближение $M_2(t)$ гиперболическим секансом, ($---$) и ($- \cdot -$) – результаты моделей Джослина (C.G. Joslin) и Грея (C.G. Gray), (\bullet) – результаты моделирования молекулярной динамики.

о том, что временные масштабы стохастической силы, действующей на частицу, и ее функции памяти – соизмеримы. Для более детальной оценки немарковских эффектов был рассчитан параметр немарковости автокорреляционной функции скорости, для которого было получено следующее выражение:

$$\varepsilon_0 = \frac{4\pi n}{3} \left(\frac{mD}{k_B T} \right)^2 \int_0^\infty dr g(r) r^2 \left[\frac{3}{r} \frac{\partial U(r)}{\partial r} + r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial U(r)}{r \partial r} \right) \right], \quad (5)$$

$g(r)$ – функция радиального распределения. Результаты численных расчетов ε_0 представлены на рис. 4.

Представленные кривые демонстрируют нелинейную спадающую n^* –зависимость параметра ε_0 , означающую усиление немарковских

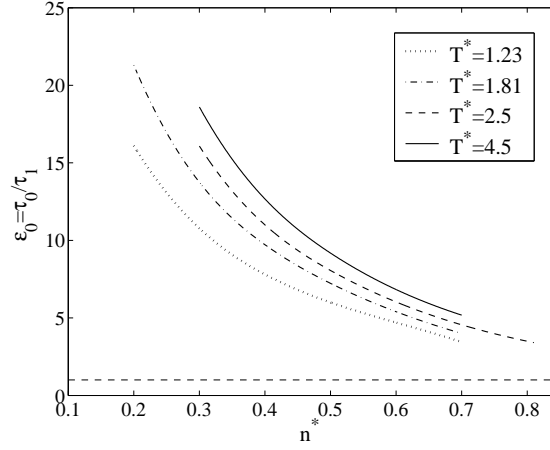


Рис. 4: Зависимость параметра немарковости ε_0 от приведенной плотности n^* при четырех различных значениях приведенной температуры $T^* = 1.23, 1.81, 2.5$ и 4.5 .

эффектов, что связано с процессами упорядочения и регуляризации блужданий частиц, возникающих при увеличении плотности. Так, для изотермы $T^* = 1.81$ в области плотности $0.2 - 0.7$ параметр ε_0 уменьшается более чем в пять раз. Эффекты памяти также преобладают в окрестности тройной точки Леннард-Джонсовской жидкости. Отношение времен релаксации ВКФ скорости и функции памяти первого порядка в этой фазовой области составляет порядка $\sim 2.5 - 5$. Это количественно подтверждает наличие сильной памяти в диффузионных процессах Леннард-Джонсовской системы вблизи тройной точки, характеризующейся отрицательными корреляциями в поведении ВКФ скорости $a(t)$. Далее обсуждается взаимосвязь эффектов памяти и нелокальности с неупорядоченностью исследуемой среды. Выводится выражение, связывающее параметр немарковости с конфигурационной энтропией. В заключительном параграфе данной главы представлено вычисление статистического спектра пара-

метра немарковости автокорреляционной функции скорости (на примере первых трех точек) для модельной системы Рабина: частица в гармонической решетке. Для этой системы точно выводится соотношение, свидетельствующее о равенстве времен релаксации силы, действующей на частицу, и ее функции памяти, что было ранее обнаружено для Леннард-Джонсовских жидкостей.

В заключении сформулированы основные результаты:

1. Построена микроскопическая теория структурной релаксации в жидких щелочных металлах, которая учитывает эффекты нелокальности и статистической памяти и хорошо согласуется с экспериментальными данными.

2. Получено уравнение для динамического структурного фактора, численные расчеты которого проведены для жидких щелочных металлов (*Li*, *Na*, *Rb*, *Cs*). Обнаружено убедительное согласие теоретических результатов с новейшими экспериментальными данными по неупругому рассеянию рентгеновских лучей (ESRF, Гренобль, 2000 – 2004 гг.), а также с известными данными по рассеянию медленных нейтронов.

3. Найдена взаимосвязь развиваемой теоретической модели с такими подходами, как вязкоупругая модель Лавси (S.W. Lovesey), двух-экспоненциальная вязкостная модель, формализм обобщенных мод.

4. Выполнен детальный анализ экспериментальных спектров динамического структурного фактора. Получено подтверждение Балукани об универсальной природе динамических процессов в жидких щелочных металлах.

5. Вычислена пространственная дисперсия параметра немарковости для релаксационных процессов, вносящих вклад в спектры динамического структурного фактора при рассеянии медленных нейтронов и рентгеновских лучей. Найдено, что эффекты статистической памяти сильно выражены в так называемых “промежуточных” пространственных областях (область между гидродинамическим преде-

лом, $k \rightarrow 0$, и сужением по де Женну, $k \approx 2\pi/\sigma$) и могут влиять на существование высокочастотного пика в динамическом структурном факторе.

6. На основе идеи о сокращенном описании получены выражения для коэффициента самодиффузии. Выполнены соответствующие численные расчеты для Леннард-Джонсовских жидкостей на широком интервале температур и плотностей, а также сравнения с результатами моделирования молекулярной динамики и других теоретических подходов.

7. Исследовано влияние эффектов памяти, порождаемых неупорядоченностью среды, на тепловое движение частиц в Леннард-Джонсовских жидкостях. Обнаружено и численно оценено возрастание эффектов памяти при уплотнении среды и понижении температуры.

8. Выполнено исследование немарковских эффектов для модели Рабина: частица в гармонической решетке. Получены точные выражения для соответствующих параметров немарковости.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах

1. Mokshin A.V. Time-scale invariance of relaxation processes of density fluctuation in slow neutron scattering in liquid cesium / A.V. Mokshin, R.M. Yulmetyev, P. Hänggi, V.Yu. Shurygin // Phys. Rev. E - 2001.-Vol.64.-P.057101(1)-057101(4).
2. Mokshin A.V. Dynamic structure factor in liquid cesium on the basis of time-scale invariance of relaxation processes / A.V. Mokshin, R.M. Yulmetyev, P. Hänggi, V.Yu. Shurygin // Письма в ЖЭТФ.- 2002.-Т.76.-С.147-151.
3. Mokshin A.V. New evidence for the idea of time-scale invariance of relaxation processes in simple liquids: the case of molten sodium / A.V. Mokshin, R.M. Yulmetyev, T. Scopigno, P. Hänggi // J. Phys.: Condens. Matter - 2003. - Vol.15.- P.2235-2257.

4. Mokshin A.V. Diffusion Time-Scale Invariance, Randomization Processes and Memory Effects in Lennard-Jones Liquids / A.V. Mokshin, R.M. Yulmetyev, P. Hänggi // Phys. Rev. E - 2003. - Vol.68.- P.051201(1)-051201(5).
5. Mokshin A.V. Relaxation time scales in collective dynamics of liquid alkali metals / A.V. Mokshin, R.M. Yulmetyev, P. Hänggi // J. Chem. Phys.-2004.-Vol.121, №15.-P.7341-7346.
6. Mokshin A.V. Diffusion processes and memory effects / A.V. Mokshin, R.M. Yulmetyev, P. Hänggi // New J. Phys.-2004.-Vol.6.-P.1-10. (принята к печати)
7. Mokshin A.V. Universal Approach to Overcoming Nonstationarity, Unsteadiness and Non-Markovity of Stochastic Processes in Complex Systems / A.V. Mokshin, R.M. Yulmetyev, P. Hänggi // Physica A -2005.-Vol.345.-P.303-325.
8. Mokshin A.V. Time-scale invariance of relaxation processes in inelastic X-ray and neutron scatterings in liquid alkali metals / A.V. Mokshin // Сборник тезисов IX международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам “Ломоносов-2002” - Физический факультет МГУ, Москва, 2002. - С.192.
9. Mokshin A.V. Mathematical modeling of seismic phenomena by discrete non-Markov nonstationary processes / A.V. Mokshin, R.M. Yulmetyev, F.M. Gafarov // Сборник докладов V Int. Congress on Mathematical Modelling - ОИЯИ, Дубна, 2002. - С.41.
10. Мокшин А.В. Коллективные возбуждения в жидких металлах / А.В. Мокшин // Сборник тезисов итоговой республиканской конференции студентов и аспирантов - Казань, 2002. - С.26-27.
11. Мокшин А.В. Динамический структурный фактор в рассеянии рентгеновских лучей в жидком натрии / А.В. Мокшин, Р.М.

- Юльметьев // Тезисы докладов XXXIII Совещания по физике низких температур - Екатеринбург, 2003. - С.308.
12. Mokshin A.V. Memory functions in analysis of complex systems / A.V. Mokshin, R.M. Yulmetyev // Доклады VI международной научно-технической конференции "Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии" - Владимир, 2004. - С.122-125.
 13. Мокшин А.В. Динамический структурный фактор жидких щелочных металлов / А.В. Мокшин // Сборник докладов XV Международной школы-семинара по современным проблемам теоретической и математической физике "Волга-2003" - Казань, 2003. - С.37.
 14. Мокшин А.В. Масштабно-временная инвариантность релаксационных процессов в жидких металлах / А.В. Мокшин // Сборник материалов научно-практических конференций студентов и аспирантов ВУЗов г.Казань за 2002 и 2003 годы - Казань, 2003. - С.40-41.
 15. Мокшин А.В. Универсальность релаксационных процессов в жидких щелочных металлах / А.В. Мокшин, Р.М. Юльметьев, И. Романова // Материалы третьей междисциплинарной конференции "НБИТТ-21" - ПетрГУ, Петрозаводск, 2004. - С.59.
 16. Mokshin A.V. Density fluctuation in liquid cesium, sodium and lithium / A.V. Mokshin, R.M. Yulmetyev // Тезисы докладов международной конференции "Nanoscale Properties of Condensed Matter Probed by Resonance Phenomena" - Казань, 2004. - С.117.